

原子力学会バックエンド夏期セミナー

東日本大震災の教訓を踏まえた 地層処分の安全確保の取り組み

2013年8月7日

原子力発電環境整備機構(NUMO)



1. 背景(検討の位置づけ)

2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生。

- M_w 9.0の国内観測史上最大規模のプレート間地震
- 津波が発生し、沿岸部に甚大な被害
- 地震後、広い地域で規模の大きな地震が複数発生
- 東京電力福島第一原子力発電所事故が発生

- 東北地方太平洋沖地震のような地震が将来発生しても地層処分の安全性が確保できるかについて確認が必要。
- 必要であれば追加対策を講じ、また、技術開発により対策強化。



1. 背景（検討の対象）

（1）操業期間中の安全確保に関する取り組み

- ・ 地震のみならず，設計想定を超える状態に対する安全対策の裕度の確認。
- ・ 裕度が十分でない場合には，追加対策を検討。
- ・ さらに，災害時の対応について緊急時の体制や，復旧策の整備。

（2）閉鎖後長期の安全確保に関する取り組み

- ・ 東北地方太平洋沖地震の観測結果や学術的知見に基づく地震・断層活動の地層処分システムに対する影響の検討

安全確保上の課題を把握し，計画的な技術開発により改良することで，安全性を向上させる。

1. 背景

2. 操業期間中の安全確保に関する取り組み

地上施設および地下施設における異常状態とその際の廃棄体，オーバーパックの頑健性を評価した結果について報告

3. 閉鎖後長期の安全確保に関する取り組み

地震・断層活動の地層処分システムへの影響として，①断層の「ずれ」，②地震の「ゆれ」，③地震に伴う地下水の影響のうち，③の影響について検討した結果について報告

4. 今後の取り組み

2.1 安全確保の考え方(「地層処分事業の安全確保(2010年度版)*¹」)

*¹ 以下、2010年技術レポート

■ 操業期間中の安全確保*²

- 放射線安全

- 原子力関連施設(高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターなど)の安全対策を適用

- 一般労働安全

- 一般の土木工事、鉱山開発などの安全対策を適用

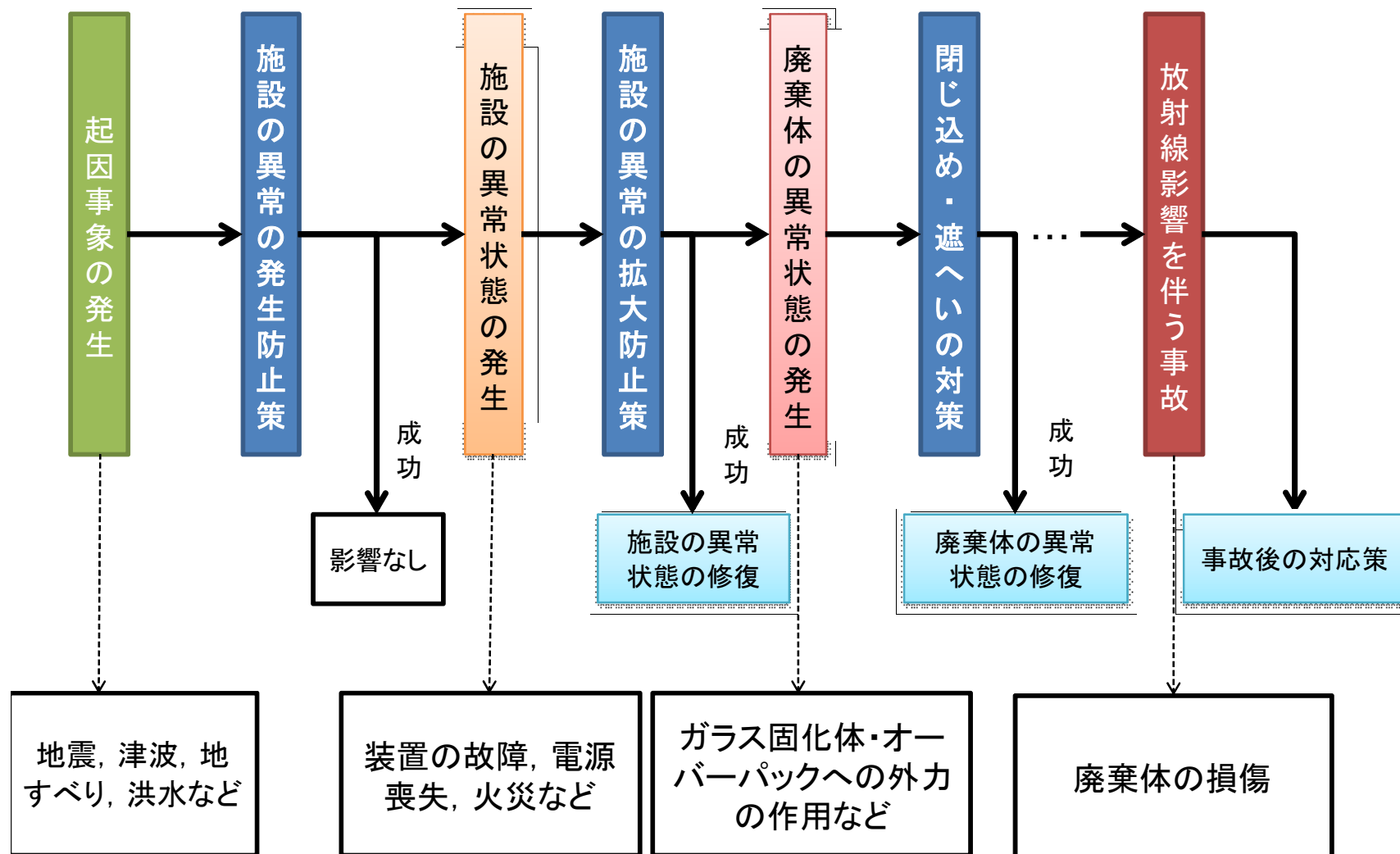
- 上記の安全対策を参考として、安全対策の要件や考え方を整理し、対策案を例示した。

サイト選定が開始されてから、地域の自然環境などの条件に合わせて、安全対策を具体化し、施設設計に反映する計画であった。

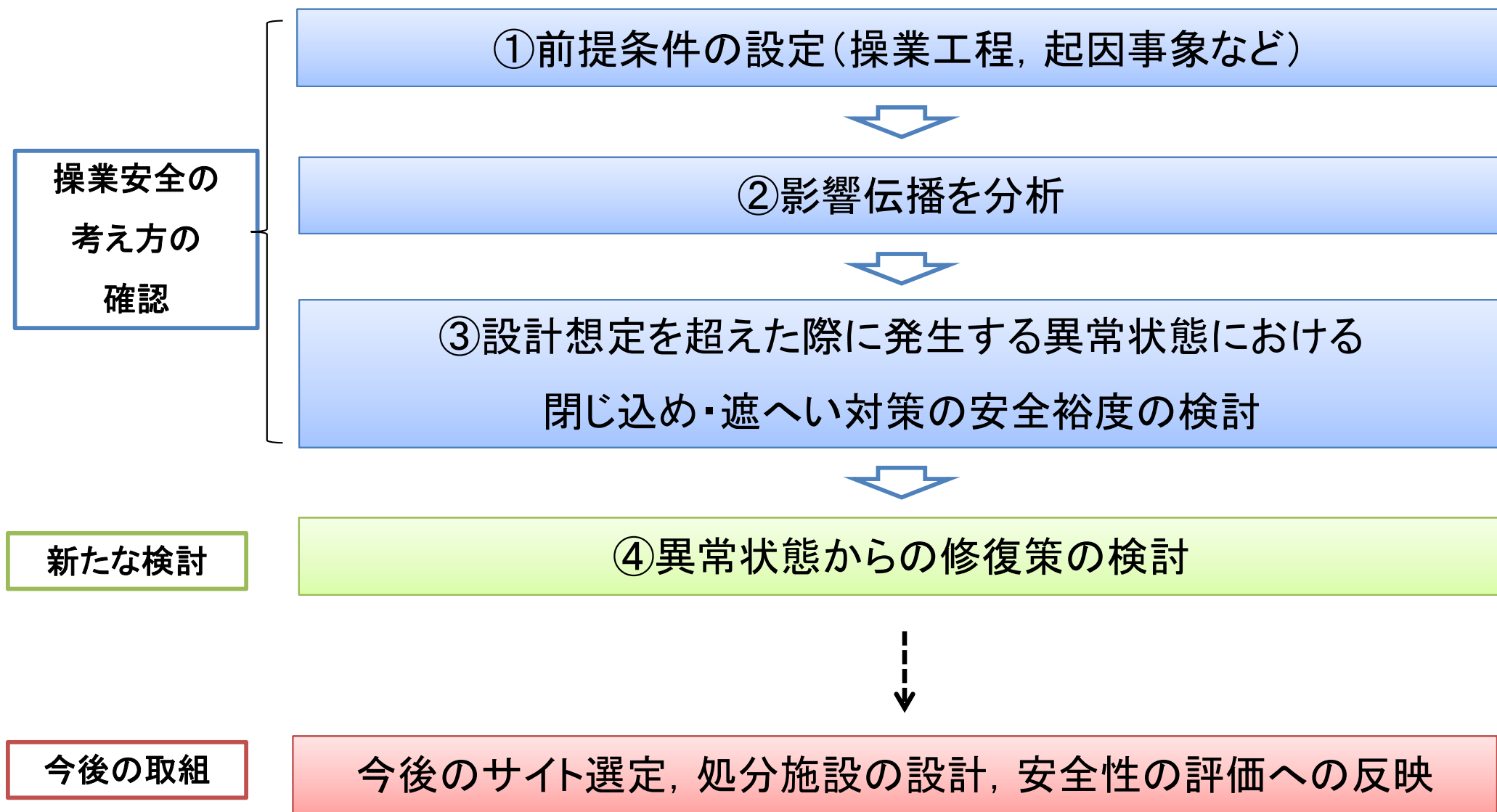
*² 建設・操業・閉鎖の段階

2.2 操業期間中の安全確保の考え方

多重防護の考え方に基づいた安全対策



2.3検討方法

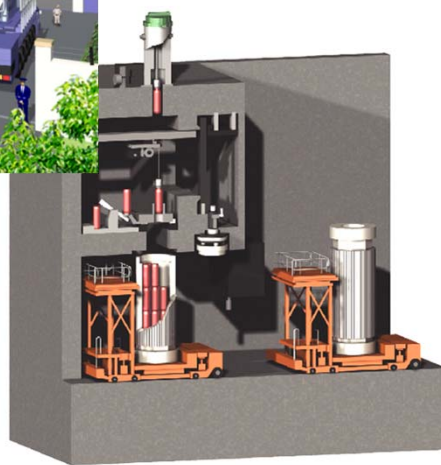


2.4(1) 操業工程と安全対策(地上施設)

輸送



ガラス固化体取り出し



- ・耐震設計
- ・耐火構造・消火設備
- ・負圧管理・遮へい構造など

受け入れ検査(一時仮置き)

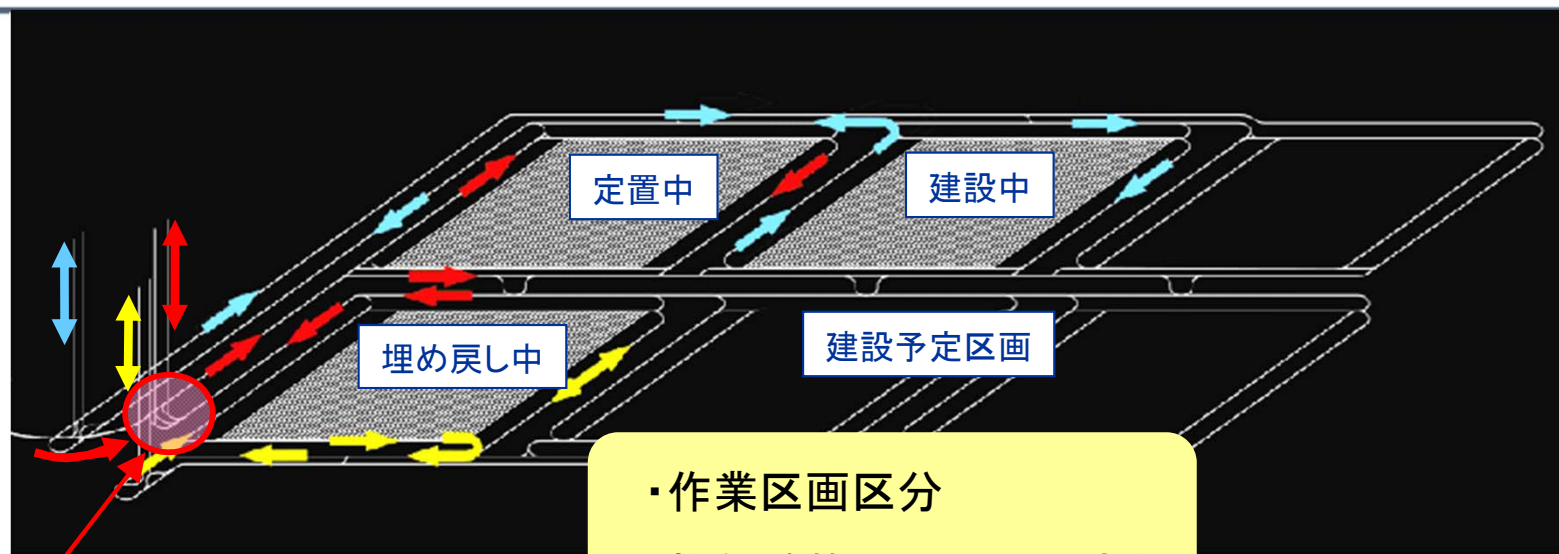
- ・耐震設計
- ・安全装置(インターロック)
- ・落下防止装置
- ・吊り上げ高さ制限など



- ・耐震設計
- ・安全装置(インターロック)
- ・緊急停止装置
- ・転倒・脱輪防止機構など

オーバーパックへの封入

2.4(1) 操業工程と安全対策(地下施設)



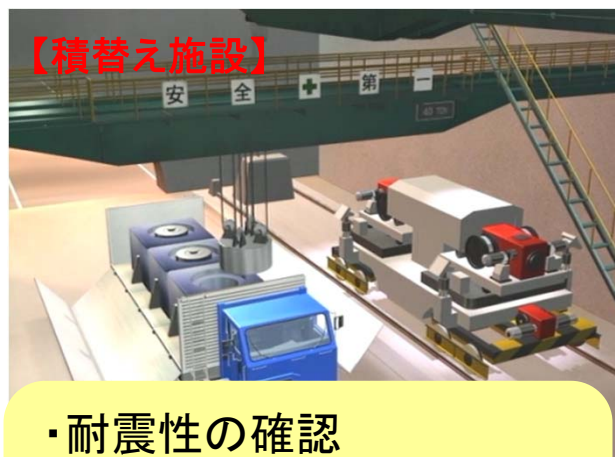
- ← 建設作業
- ← 定置作業
- ← 埋め戻し作業

- ・作業区画区分
- ・放射線管理区域の設定など

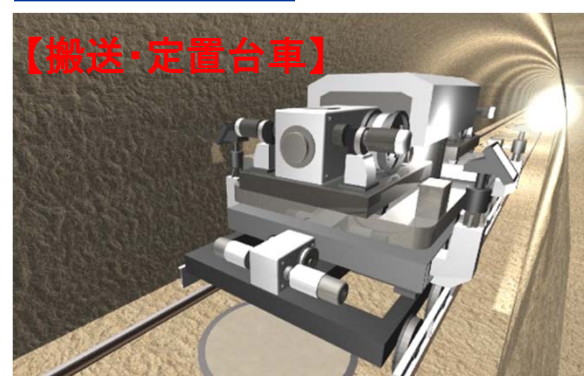
O/P積替え

坑道内搬送

定置



- ・耐震性の確認
- ・遮へい構造
- ・監視カメラ・通信設備など



- ・安全装置(脱線防止装置, 非常停止装置, 障害物検知機構, 過走行防止装置など)
- ・監視カメラ・通信設備, 過重センサーなど



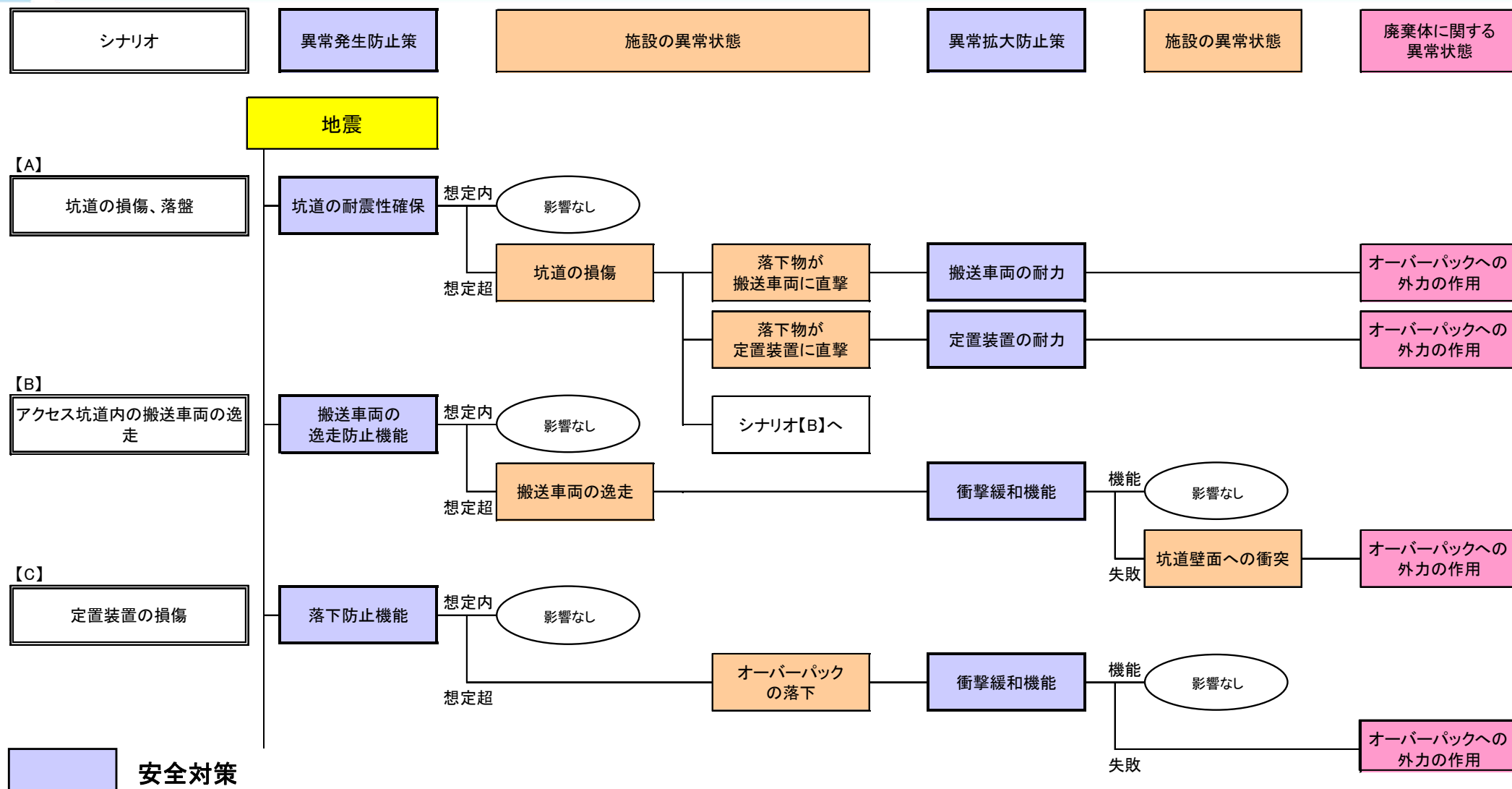
2.4(2) 操業安全にかかわる起因事象(自然事象)

起因事象	対応の考え方
	(NUMO, 2004, 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, TR-04-02)
断層活動	活断層の存在が文献調査で明らかな地域は, 概要調査地区に含めない。
噴火	第四紀に活動したことのある火山の存在が, 文献調査で明らかな地域は概要調査地区に含めない。
地震	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
津波	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
火砕流	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
台風	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
洪水	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
豪雪	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
地すべり	自然災害が発生する可能性が小さいこと(設計による対応も可能)
有害ガス	地下施設の施工性, 経済性, 安定性の観点から, 発生する可能性が小さいこと
異常出水	地下施設の施工性, 経済性, 安定性の観点から, 発生する可能性が小さいこと

上記の対応の考え方に基づいて, サイト選定時や施設の配置, 施設設計を検討する際に, 自然事象の影響を受けにくいように対応する。

2.5 (1) 影響伝播の分析

例) 地下施設における影響伝播の分析



安全対策は多重に準備し、個々に裕度をもたせることで、オーバーバックあるいはガラス固化体に影響を与える状態に容易に達しないようにする。

2.5 (1)影響伝播の分析(結果のまとめ)

外力:地震力, 衝撃力, 水圧など

	起因事象	施設の異常状態	廃棄体などの異常状態	影響を受ける安全機能
地上施設	地震	・遮へい壁への地震力の作用		遮へい
	地震など	・装置故障→取り扱い中の把持具からの落下	ガラス固化体に対する外力の作用	閉じ込め
	地震など	・電源喪失→換気停止 ・装置故障→取り扱い装置からの出火	ガラス固化体の温度上昇	
地下施設	オーバーパック, 岩盤により遮へい機能は十分な裕度を有する。			遮へい
	地震, 有害ガス, 異常出水, 津波・洪水(浸水として)	・車両故障→車両逸走 ・坑道の落盤 ・有害ガス(メタンガス)の爆発 ・積替え, 定置作業中の落下 ・地下施設の水没	オーバーパックへの外力の作用	閉じ込め
	人為ミスなど	・車両故障→逸走→搬送車両の火災	オーバーパックの温度上昇	

廃棄体に関する異常状態は, 温度上昇と外力の作用に大別できる。特に影響が大きいと考えられるケース(赤字の状態)について, 廃棄体の閉じ込め機能の裕度を報告する。



2.6(1)地上施設における異常状態に対する裕度の検討

○裕度の検討項目

- 落下によるガラス固化体への衝撃力の作用
- 換気停止に伴うガラス固化体の温度上昇



2.6(1)落下によるガラス固化体への衝撃力に対する裕度(1)

○検討した異常状態

- 天井クレーンにより、ガラス固化体を吊り上げている最中に、自然事象の発生に伴うクレーンの故障などが起こり、廃棄体が落下する可能性。

対応方針(安全対策)

- ワイヤの二重化
- 機械的把持機構の採用
- 吊り上げ高さの制限

2.6 (2) 換気停止に伴うガラス固化体の温度上昇に対する裕度 (1)

○検討した異常状態

ガラス固化体受け入れ・検査施設において、電源喪失などに伴い換気設備が停止した場合、一時仮置き中のガラス固化体の温度が上昇した状態。

対応方針(安全対策)

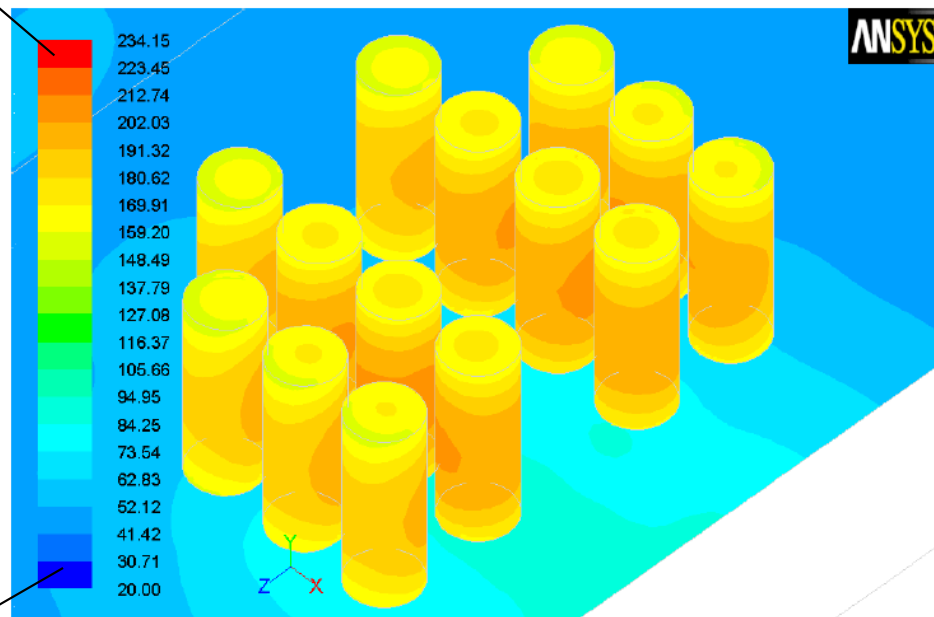
- 電源喪失に対しては、非常用電源の確保などを実施することが可能。

2.6(2)換気停止に伴うガラス固化体の温度上昇に対する裕度(2)

ガラス固化体28本を受け入れ検査のため、仮置き中に、30日間にわたり電源が喪失し、換気機能が停止した状態。

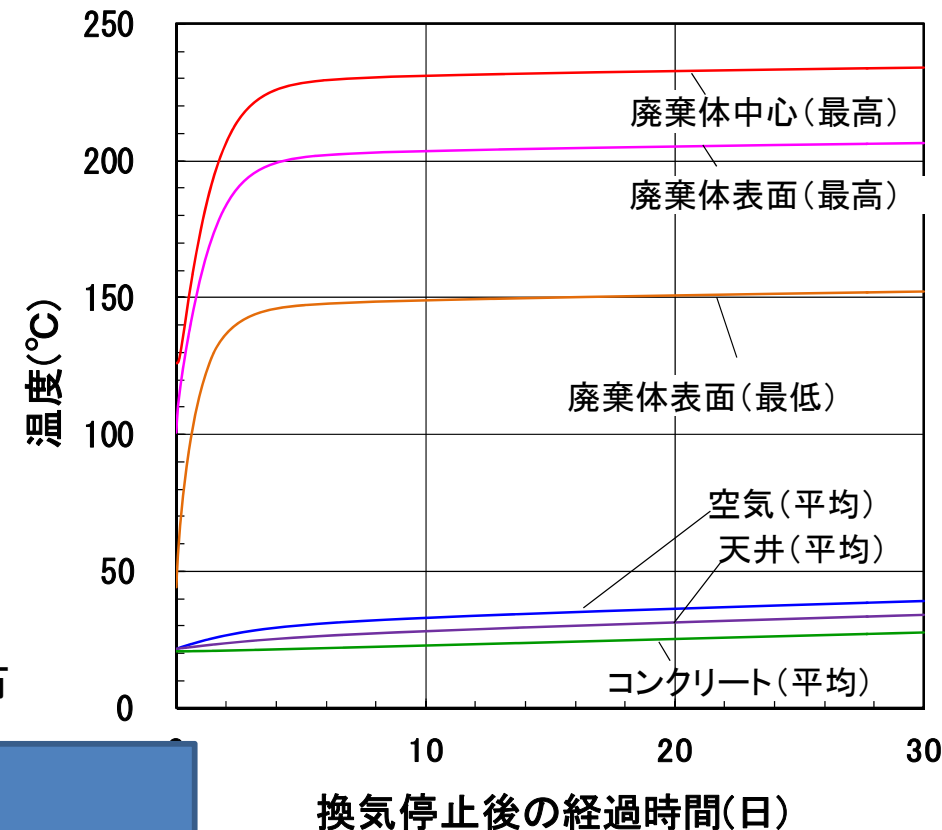
(30年冷却(約600W), 空気対流を考慮しない保守的な評価)

温度高い(赤:230℃)



温度低い(青:20℃)

解析結果: ガラス固化体の温度分布



換気停止後の経過時間(日)

コンクリート壁に熱が吸収されるため、温度の上昇が鈍化する。

安全裕度の検討結果

停止後、5日程度で急激に温度が上昇し、その後、温度上昇は著しく鈍化する。ステンレス製キャニスタに影響はない。



2.7地下施設における廃棄体の異常状態に対する裕度の検討

○オーバーパックの耐衝撃性の限界の検討

- ・オーバーパックに貫通亀裂が発生する条件の検討

○裕度の検討項目

- ・アクセス坑道(斜坑)搬送中の車両の逸走
- ・メタンガス爆発の衝撃
- ・坑底施設の積替え時の落下, 定置時の処分孔への落下

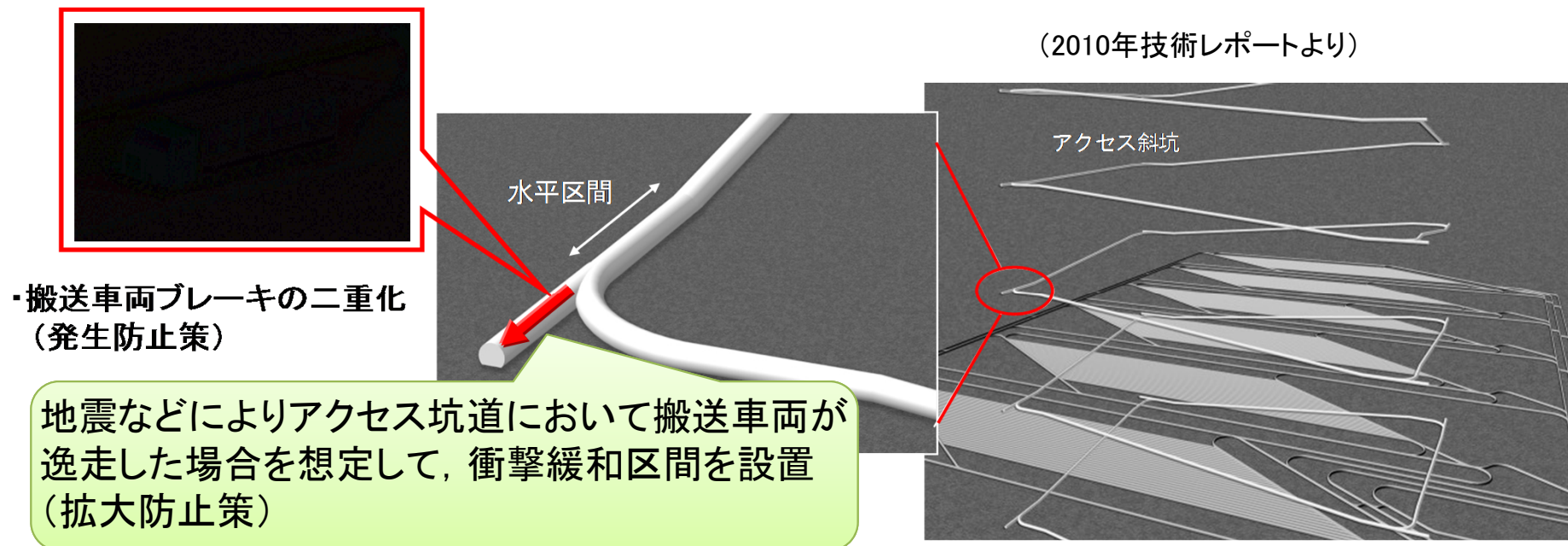
2.7(1) アクセス坑道(斜坑)搬送中の車両の逸走(1)

○検討した異常状態

搬送車両のブレーキが故障し、車両が斜路を逸走。坑道の壁面に衝突し、オーバーバックに衝撃力が作用した状態。

対応方針(安全対策)

- ・搬送車両ブレーキの二重化(発生防止策)
- ・斜路の水平区間の設置(拡大防止策)
- ・衝撃緩和区間の設置(拡大防止策)



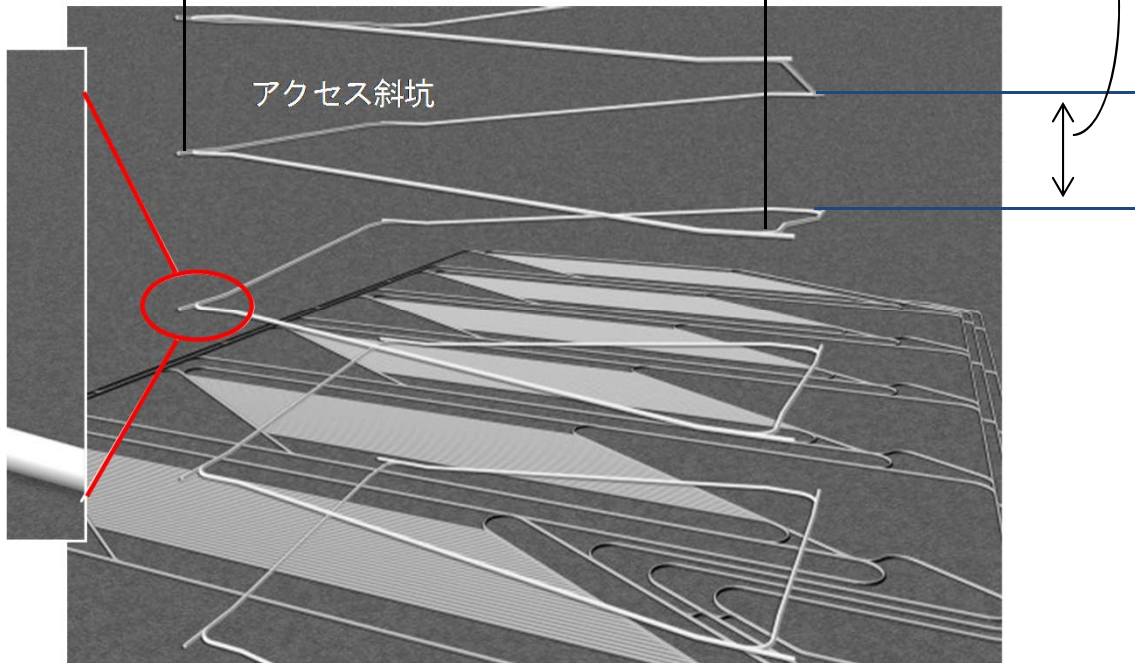
2.7(1) アクセス坑道(斜坑)搬送中の車両の逸走(2)

斜坑を逸走した最大距離を斜坑の一边とし，衝突時の最高速度を見積もる。

傾斜10%の場合，一边の長さ約250m

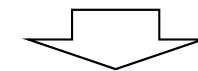
一周で100m降下

アクセス斜坑



保守的な設定

- 補助ブレーキ，坑道壁への衝突等による減速なし
- 水平区間・衝撃緩和区間での減速なし
- 搬送車両による衝撃の緩和なし

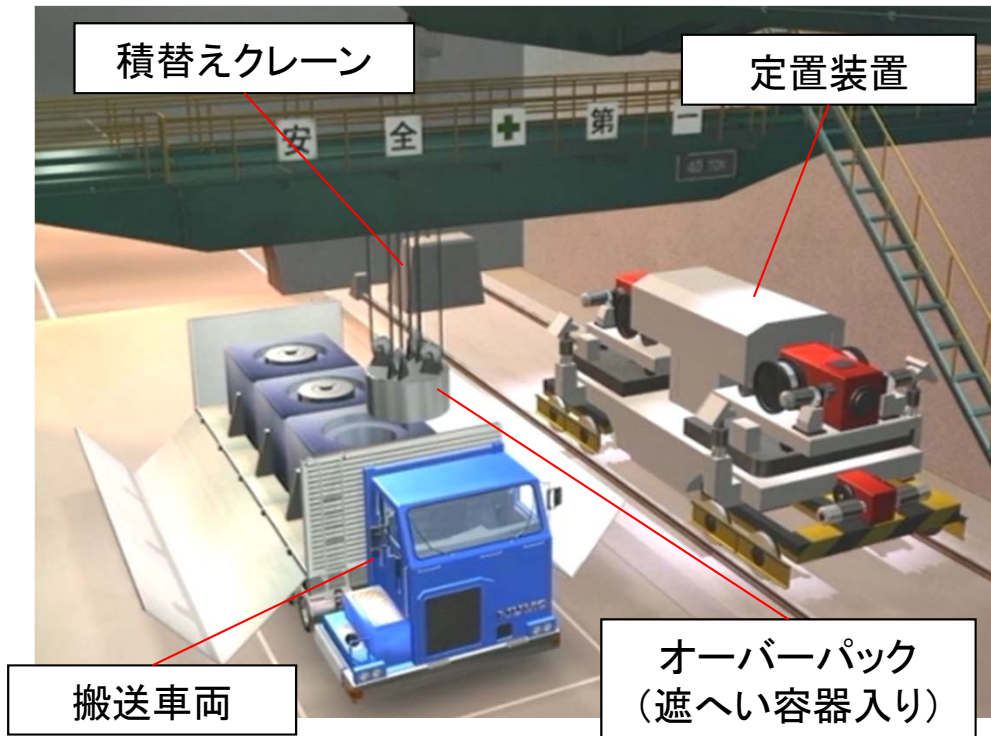


最高速度80km/hで衝突。

*実際には摩擦抵抗や，車両による衝撃の緩和などが期待できると考えられる。

2.7(2) 地下施設での積替え時、定置時の処分孔への落下の検討

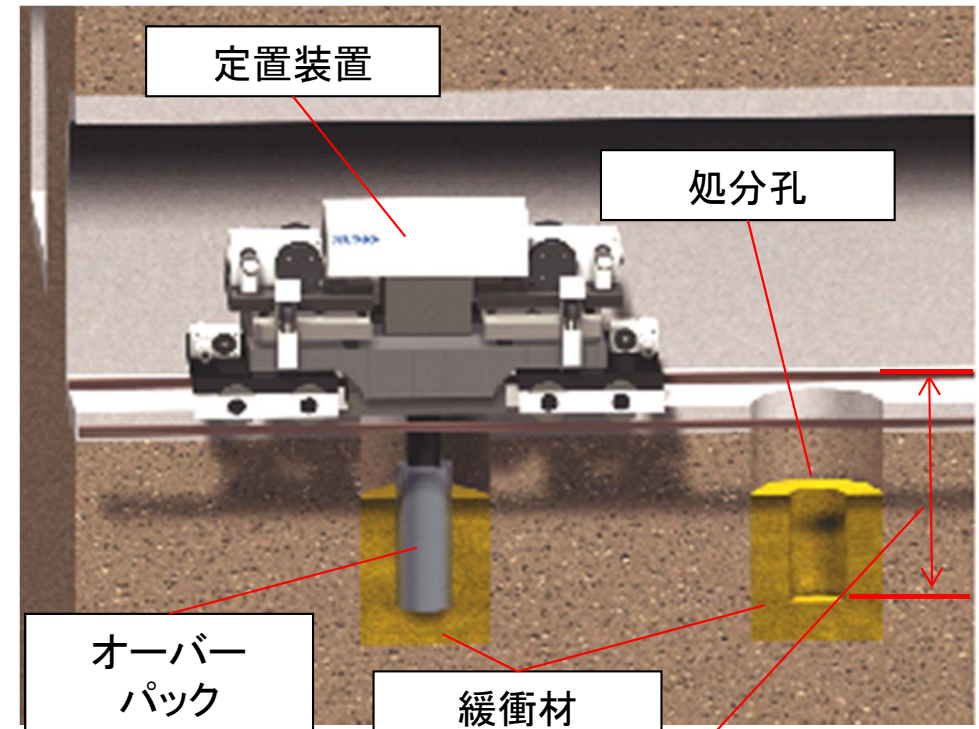
地下施設での積替え



2～3m程度の吊り上げ高さ

落下による衝突速度
23-25 km/h

定置時



4～5m程度の吊り上げ高さ

落下による衝突速度
32-36 km/h

2.7(3) オーバーパックの耐衝撃性のまとめ

作業中の異常状態を設定し，衝突速度を算出し，貫通亀裂の発生可能性について考察

事象	衝突時速度(km/h)		
	50	100	150
地下施設，斜坑逸走（一辺250m） （勾配10%,1周で100m降下）		80 km/h	破 損 限 界 速 度 113 km/h
地下施設，メタン爆発による （爆発力が最大となるメタン濃度）		72 km/h	
地下施設，定置中の落下 （吊り上げ高さ 4-5mに設定）	32-36 km/h		
地下施設，積替え時の落下 （吊り上げ高さ 2-3mに設定）	23-28 km/h		

処分場の地下施設における落下，爆発による衝撃について検討したが，オーバーパックに貫通亀裂が発生する可能性は極めて低い。

2.8(1) 異常状態からの修復策の検討

地層処分施設では、ガラス固化体のステンレス製キャニスタや金属製オーバーパックの耐衝撃性、および耐熱性により、閉じ込めの機能を失わないことを確認した。



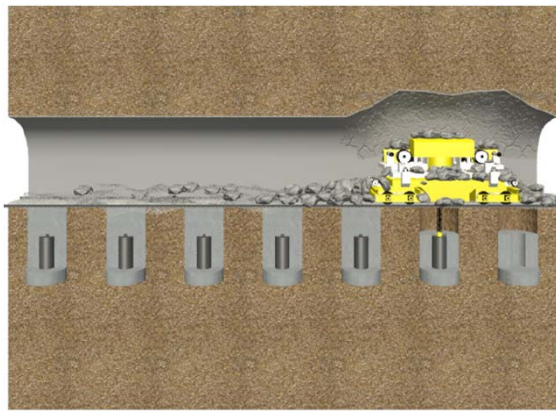
影響を受けた廃棄体の回収・点検と操業の再開のため、異常状態からの修復作業が必要。

○地下施設特有な状態として、落盤を事例として、修復策を検討

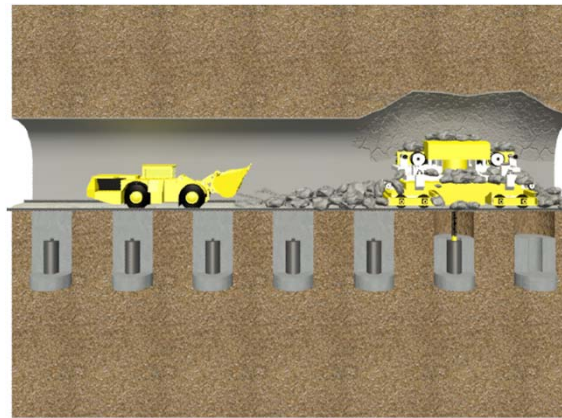
落盤に対する対応方針(安全対策)

- 岩盤の強度などの特性に応じた支保工の設置
- 坑道の耐震性の確認
- (操業期間中には) 点検と補修

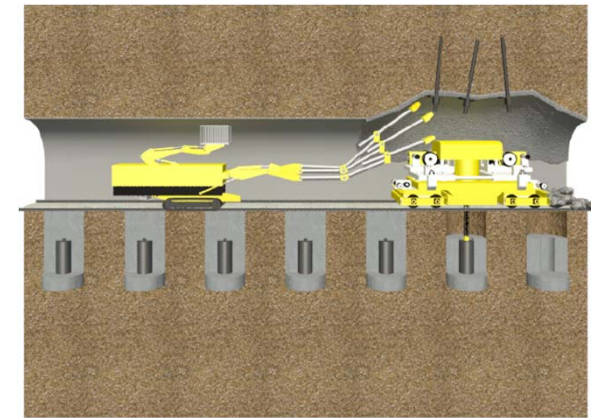
2.8(2) 地下施設における落盤からの修復策の検討例



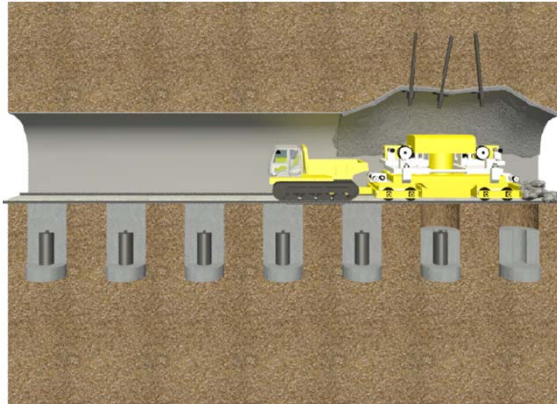
①定置装置上に落盤発生を想定



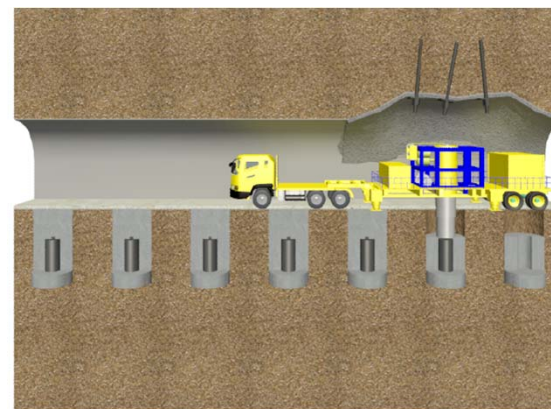
②岩塊を重機で除去



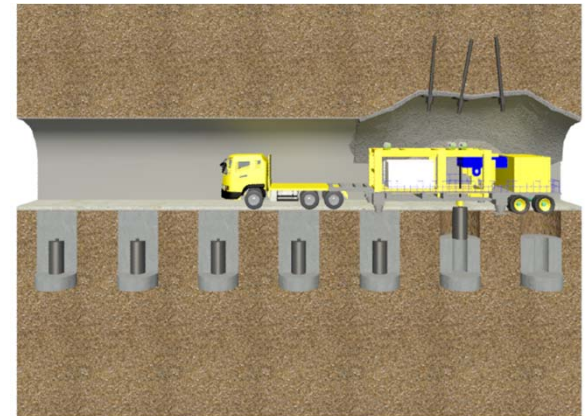
③落盤箇所を補強(吹き付けコンクリート, ロックボルトなど)



④定置装置を救援重機で移動



⑤定置途中のオーバーパックを回収(例: オーバーコアリング)



⑥オーバーパックを回収(続き)

既存技術を組み合わせることにより、修復は可能と考えられる。

2.9まとめ(1)

○操業期間中の安全確保の考え方

- 遮へい、閉じ込めの対策を基本として、異常状態を考慮した安全対策の多重化や、それぞれの安全対策自身に裕度をもたせる。

○自然事象からの影響の伝播

- 安全対策がすべて機能しない場合に、到達する異常状態
 - ガラス固化体*に外力が作用した状態
 - ガラス固化体*の温度が上昇した状態

(* または、オーバーパック)

○地上施設における異常状態に対する裕度

- ガラス固化体が落下したとしても、ステンレス製キャニスタが耐衝撃性を有するため、ガラス固化体が飛散することはない。
- 換気停止が長期間発生しても、表面温度は200℃程度までしか上昇せず、ガラス固化体のキャニスタの閉じ込め機能が損なわれることはない。



2.9まとめ(2)

○地下施設における異常状態に対する裕度

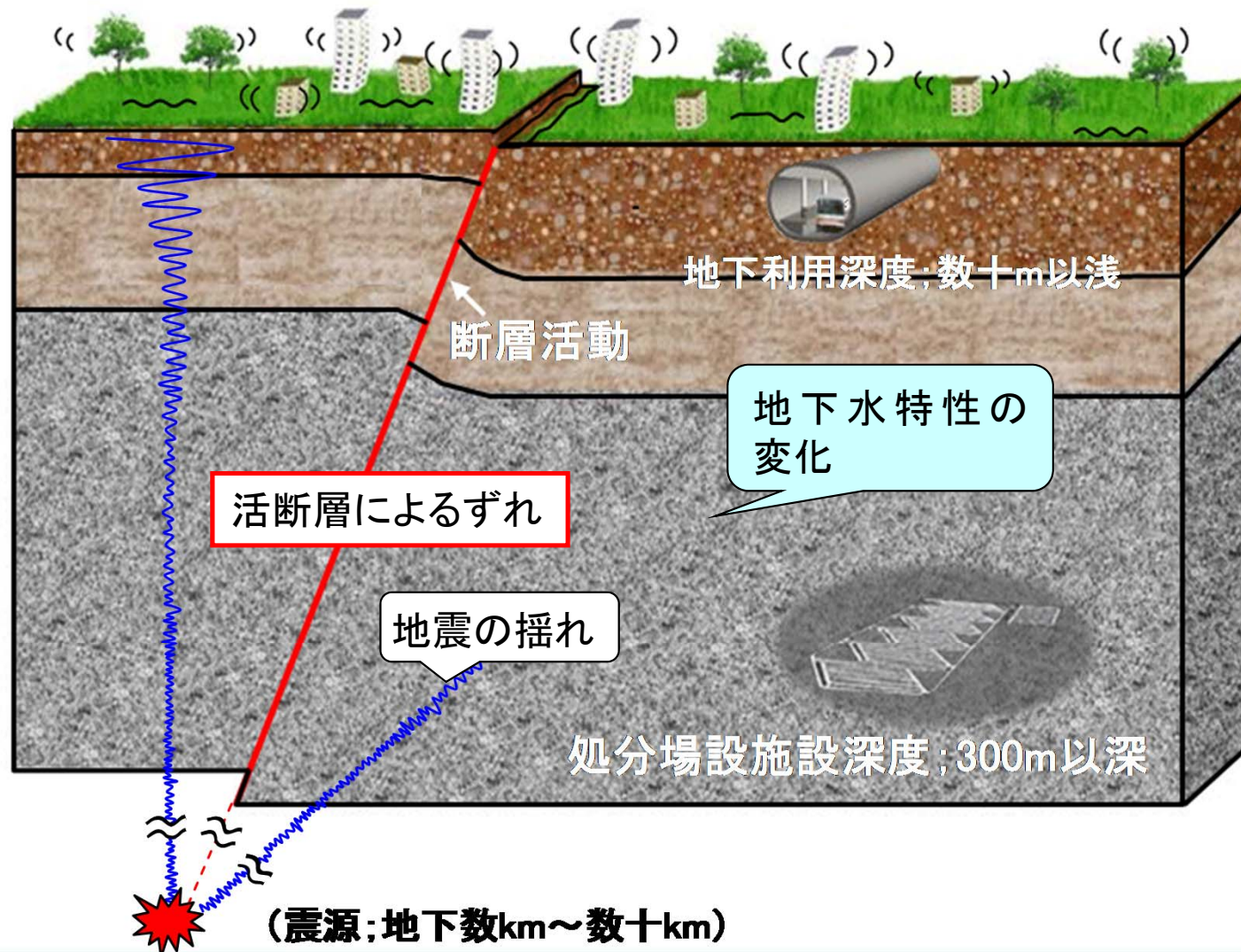
- 地下施設の操業中に特有の異常状態における裕度について検討。
 - アクセス坑道(斜坑)における搬送車両の逸走
 - 積替え中, 定置中の落下
- いずれも, オーバーパックに貫通亀裂が発生しないことを確認。
- 放射性物質の閉じ込め機能は維持される。

○想定を超える状態が発生した場合の対応策

- 地下施設特有の状態として落盤を事例として検討した復旧策を検討。
- 既存技術を組み合わせることで, 復旧は可能であると考えられる。

3.1 地震・断層活動の地層処分システムに与える影響(1)

- 地震が地層処分システムに影響を与える可能性として、「地震の揺れ」，「活断層によるずれ」，「地下水特性の変化」が考えられる。



3.1 地震・断層活動の地層処分システムに与える影響(2)

■ 地震・断層活動の影響と対応の考え方

• 「地表地震断層のずれ」

- ・断層の「ずれ」が直接処分場に達した場合、人工バリアが損傷する可能性がある。したがって、将来にわたり活動する可能性がある断層として、活断層^{*1}の分布を把握し、地層処分施設を設置しないようにする^{*2}。

• 「地震動(地震の揺れ)」

- ・地震の「ゆれ」の影響により人工バリアが損傷^{*3}することはない。

• 「地震に伴う地下水の変動」

- ・また、地震に伴う、地下水の流れや化学組成の変化については、一時的なものであり、影響は問題とならない。

*1 活断層:「過去数十万年間に繰り返し活動し、将来も活動する可能性のある断層」

*2 地層処分における断層調査の目的は、将来の地震を“予測”することが目的ではない。

*3 人工バリアに対する地震動(ゆれ)の影響は無視できることを振動試験および解析(JNC, 1999)により確認している。

3.2 東北地方太平洋沖地震に伴う地下水変化の事例(3)

(東北地方太平洋沖地震前の知見・見解)

- 数週間から数カ月程度で地下水位は回復しており、地層処分における時間スケールの観点からは、影響は小さいと考えていた。

(同地震の後の知見の追加)

- 産総研WellWebにある観測データ(約70)のうち、26データに関して、地震後に水位の変化が認められる。水位変化量は±1m以内であった。多くの例で2～16か月後には回復。
- つくば市では、18ヶ月程度経過後においても水位は回復途上にある。ただし水位変化は1m程度。
- 上記以外にも、温泉地では約30mの水位上昇が報告されている例もある(大塚ほか, 2012)。
- 2011年4月11日の福島県浜通りの地震後、湧水が継続している事例がある

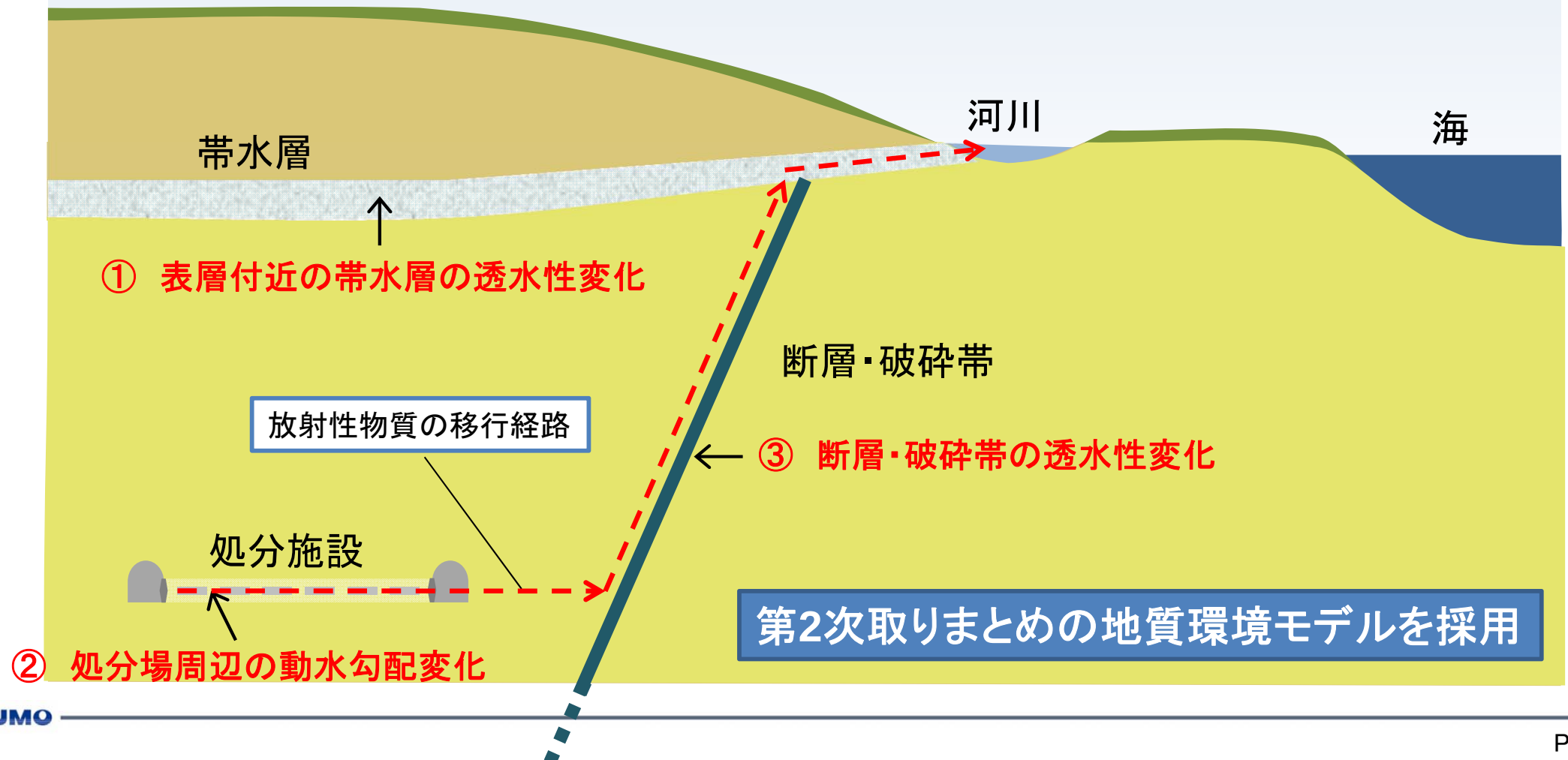


影響の評価

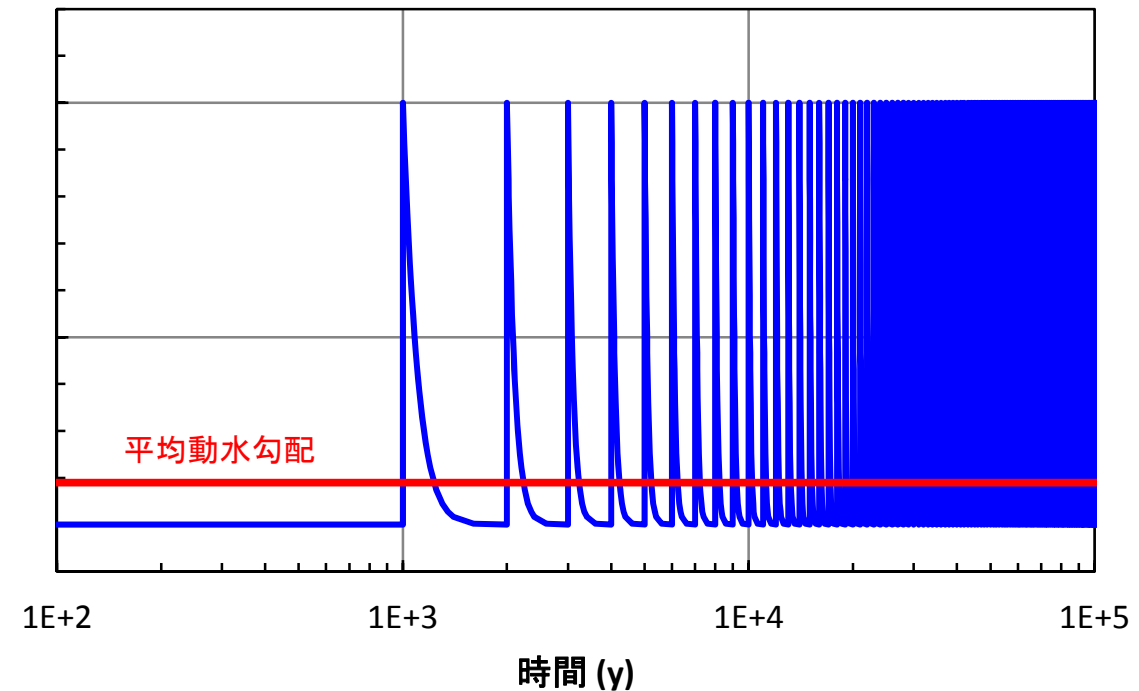
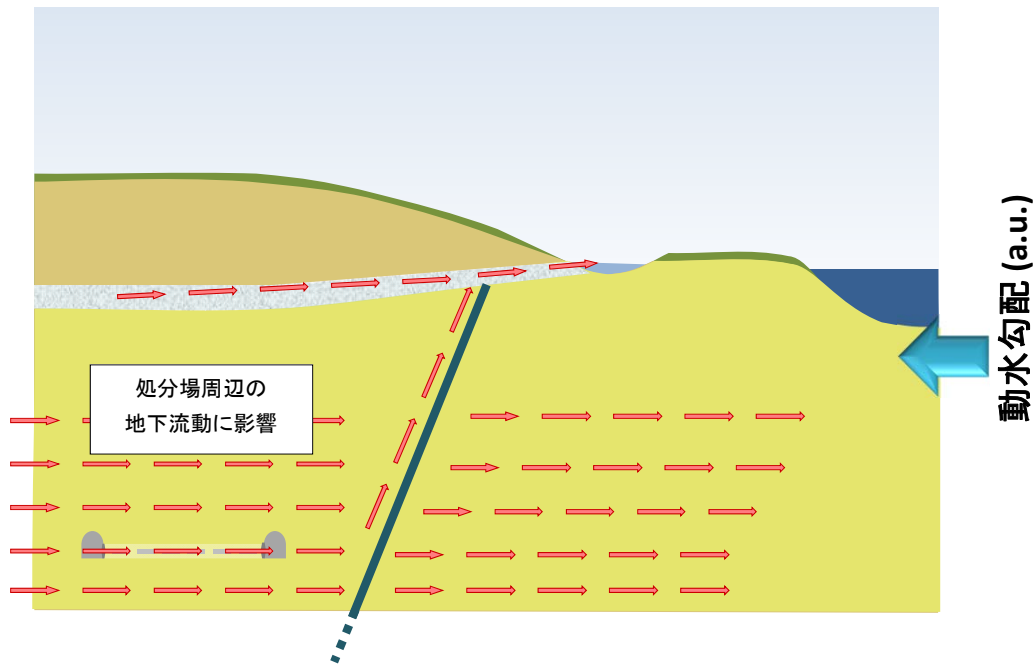
- 水位の変化がしばらく継続した場合の影響を定量的に把握する。
- 地下水位や水圧の変化に伴い地下水の流速が変化する場合、さらにはそれらの現象が繰り返し発生する場合などを想定し、その影響の評価を試みる。

3.3 地震に伴う地下水変化の地層処分システムへの影響評価(1)

地震後



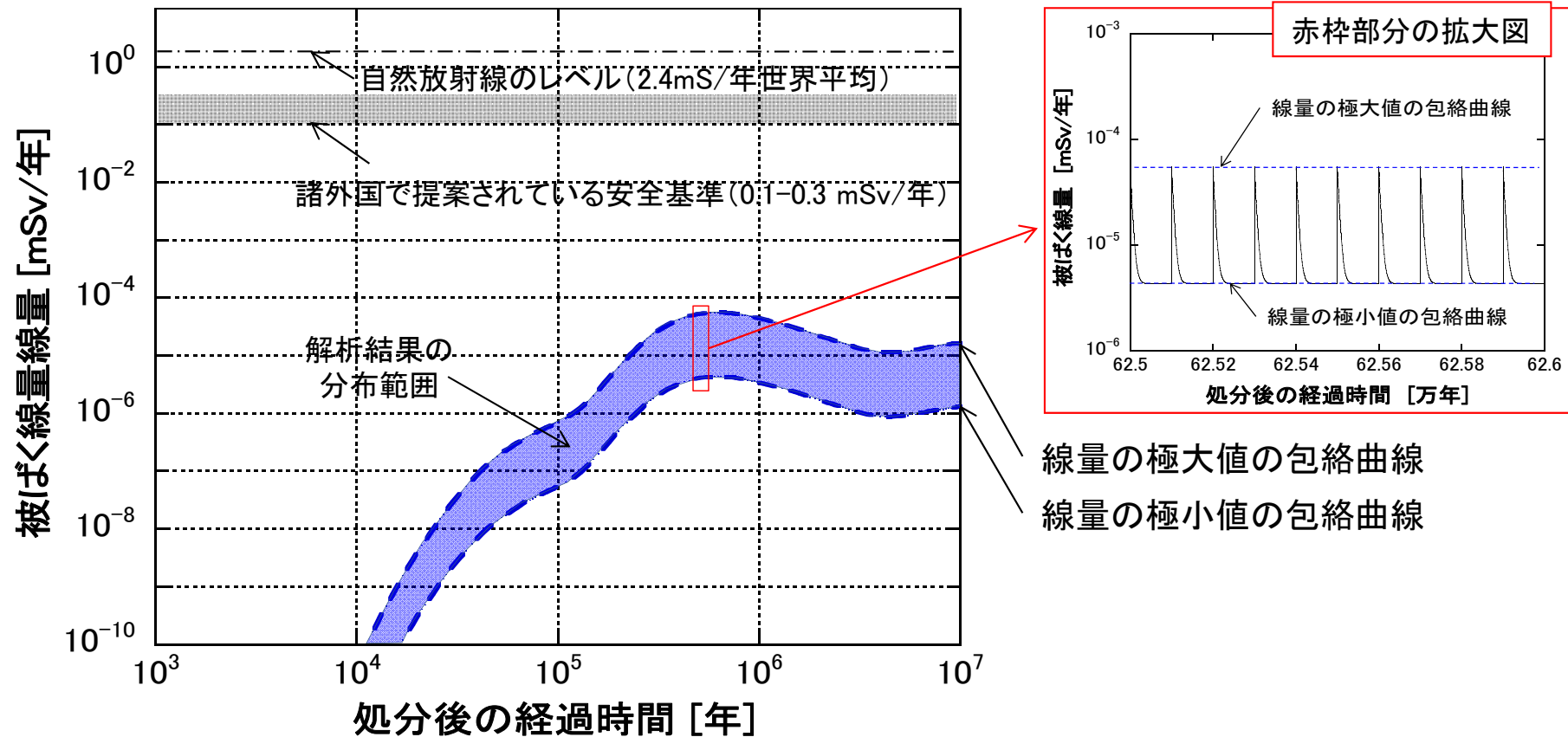
3.3 地震に伴う地下水変化の地層処分システムへの影響評価(3)



- 岩盤の圧縮または展張により地下水流動ポテンシャルが変動する
→ 動水勾配の変化として表現
- 水頭は、時間的に変化するものとし、水頭の上昇と低下が周期的に生じるものとする

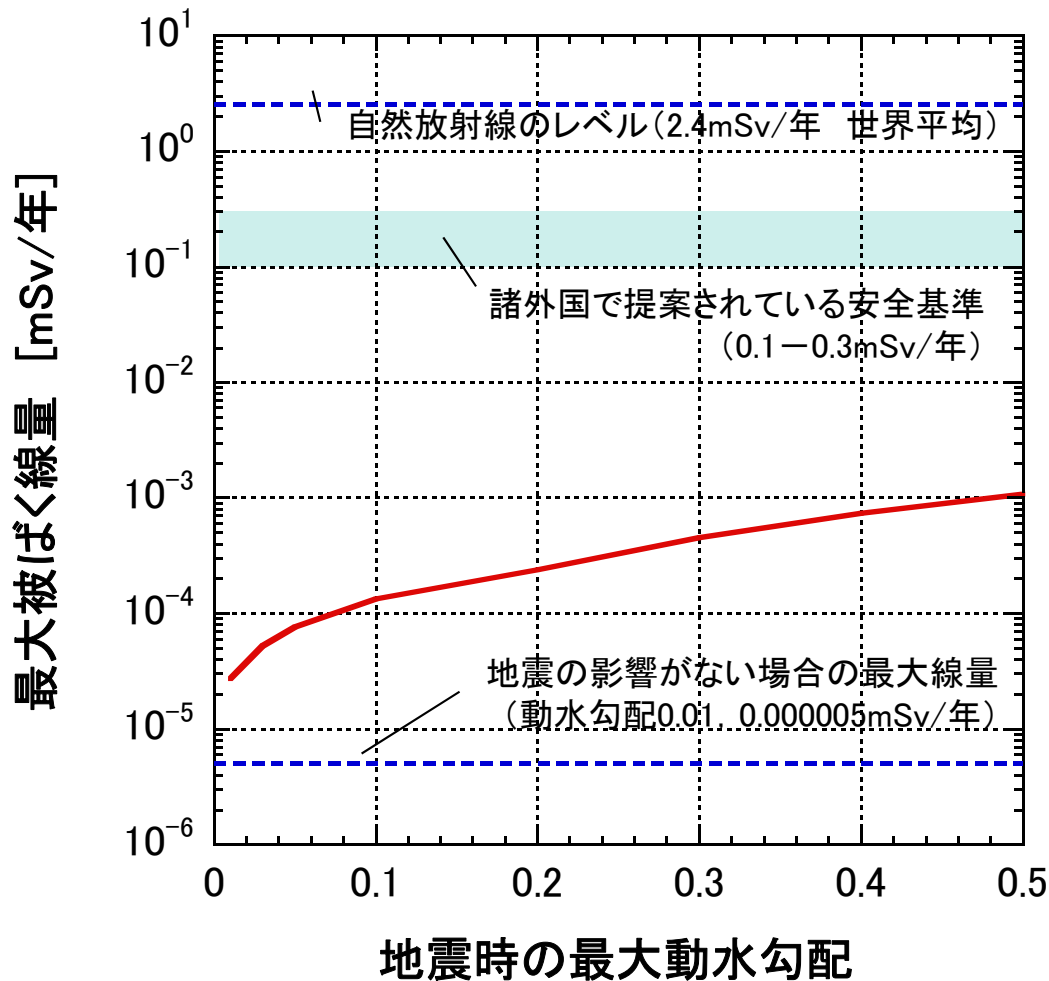
3.3 地震に伴う地下水変化の地層処分システムへの影響評価(4)

(動水勾配が最大で10倍になった場合の解析結果の例示)



- 最大被ばく線量は、線量の極大値の包絡曲線の最大値に一致する。
- 線量の極小値の包絡曲線は、地震の影響がない場合の評価曲線に概ね一致する。

3.3 地震に伴う地下水変化の地層処分システムへの影響評価(5)



○保守的な設定

- 動水勾配0.5とは、距離100mあたり50mの水頭差。局所的には発生する可能性があるが、地震の影響だけで、処分場スケール(1kmオーダー)で起こることは考えにくい。
- 東北地方太平洋沖地震のケースでも、水位変化は1m未満の地点が多い。
- 継続期間は20年程度を想定しているが、地震後長期間にわたり水位変化が継続する場合、地形などの要因が関与している可能性がある(山地で動水勾配0.23, JNC, 1999)。

地震による被ばく線量の増加は、保守的にかなり大きな影響(動水勾配, 継続時間)を考慮しても、諸外国で提案されている安全基準を下回る。

閉鎖後長期安全性に関するまとめ

- 地震・断層活動の地層処分システムへの影響として、①地表地質断層の「ずれ」、②地震の「ゆれ」、③地震に伴う地下水の変動のうち、③の影響について検討した結果について報告
- 規模の大きな地震が繰り返し発生し、その都度、地下深部の動水勾配が変化したことを想定し、動水勾配の上昇量や、継続期間、発生頻度を保守的に設定して、地層処分システムに対する影響を検討した。
- 放射線による影響は、諸外国で提案されている基準値や自然界の放射線レベルに比べ、十分小さな値であった。
- 今後も、地震・断層活動の影響については、学術的な研究開発の動向なども踏まえ、地層処分の安全確保に反映する計画である。

- 今後も継続的に検討を進め、地層処分の安全確保上の課題を把握する。
- 課題に対応して、技術開発を実施し、継続的に改良を実施することで、安全性を向上させる。

ご清聴ありがとうございました。